

# The Influence of Connection Position between Evaporation Heat Exchanger and Transformer on Flow and Heat Exchange

Tingting Liu, Yongguang Li

School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai  
Email: 845050290@qq.com

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 4<sup>th</sup>, 2018; published: May 11<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The fluent software was used to simulate and analyze the underground transformer and evaporative heat exchanger model, and the characteristics of the oil flow between the transformer and the evaporative heat exchanger and the movement of the surrounding air were obtained. Comparing and analyzing the flow field and temperature field of evaporative heat exchangers at different connection positions, it is concluded that the heat transfer conditions of the evaporative heat exchanger are better and the flow velocity of the fluid at the connection position is the fastest.

## Keywords

Underground Transformer, Evaporative Heat Exchanger, Simulation, Heat Dissipation

---

## 蒸发换热器与变压器连接位置对流动换热的影响

刘婷婷, 李永光

上海电力学院, 能源与机械工程学院, 上海  
Email: 845050290@qq.com

收稿日期: 2018年3月20日; 录用日期: 2018年5月4日; 发布日期: 2018年5月11日

---

## 摘要

应用fluent软件对地下变压器和蒸发换热器模型进行模拟与分析,得出了变压器与蒸发换热器之间的油流

特点以及周围空气的运动情况。对比分析不同连接位置的蒸发换热器的流场和温度场, 得出了蒸发换热器位置靠上的位置的模型换热情况较好, 以及流体在连接位置的流动速度最快的结论。

## 关键词

地下变压器, 蒸发换热器, 模拟, 散热

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

随着城市的迅速发展, 其对电力资源需求的日益增加与用地制约的矛盾也逐渐凸显, 为解决这一问题, 越来越多的城市地下变电站应运而生[1] [2]。

传统的热交换冷却技术包括油浸自冷式、油浸风冷式、强油风冷及强油水冷式等等[3] [4]。

由于地下变电站的特殊情况, 以上冷却方式都存在的问题。而蒸发冷却这种相变的散热方式却可以依靠沸腾产生的密度差即可形成自然循环, 无需外加驱动设备, 提高了运行的可靠性[5], 无风机, 降低了噪音水平[6], 而且对于大功率地下变压器同样适用。可以将散热设备与变压器本体分离安装, 使地下变压器的散热设备可置于地面或屋顶, 在节省占地面积的同时维护工作量也将大大减小。相变冷却是目前电气设备冷却降温方式的重大改进[7]。

本文将对散热设备应用蒸发冷却技术的地下变压器进行数值模拟与实验, 通过温度场和流场的分析得到变压器油在蒸发换热器和变压器之间流动的规律, 分析比较两个不同位置蒸发换热器模型的流动和传热情况, 为蒸发冷却技术在油浸式变压器的散热设备中的应用提供一定的优化思路。

## 2. 模型的建立

### 2.1. 物理模型

变压器蒸发冷却系统如图 1 所示, 变压器运行时, 可能会因绕组短路、铁芯局部温度过高、铁芯绕组间发生磁滞损耗和涡流损耗和开关接触不良等原因造成其温度上升。升温后的变压器油从变压器的出油口流出, 通过连接管道流入蒸发换热器 A 内, 在冷却管外壁流过时与管内的制冷剂发生热交换, 热油降温。当变压器油温度升高至大于冷媒的沸点温度时, 蒸发器 A 中的冷媒汽化, 气体通过其与上端冷凝器的管道进入冷凝器 B 内, 随后在冷凝器 B 内与外界环境发生热量交换, 液化后在重力的作用下回流蒸发换热器内部的冷却管内, 等待下一次的蒸发冷却循环。热油在蒸发换热器内得到冷却后回到变压器箱内。整个过程无需任何的外界驱动。

蒸发换热器和变压器位于地下, 冷凝器位于地上, 本文主要研究地下变压器油的循环流动状态, 而油的流动发生在变压器与蒸发换热器之间, 因此不考虑制冷剂在冷凝器 B 中的流动情况, 在模拟计算时通过对冷却管的定壁温设置来代替制冷剂的循环。故建立模型时只考虑蒸发换热器和变压器。

建立模型时考虑环境温度对换热的影响, 这里用 3000 mm × 3000 mm × 3000 mm 的正方体来模拟环境边界, 置于蒸发换热器与变压器模型的外部, 示意图如图 2 所示, 两个模型除了接口位置不同, 其余的设置尺寸均相同。

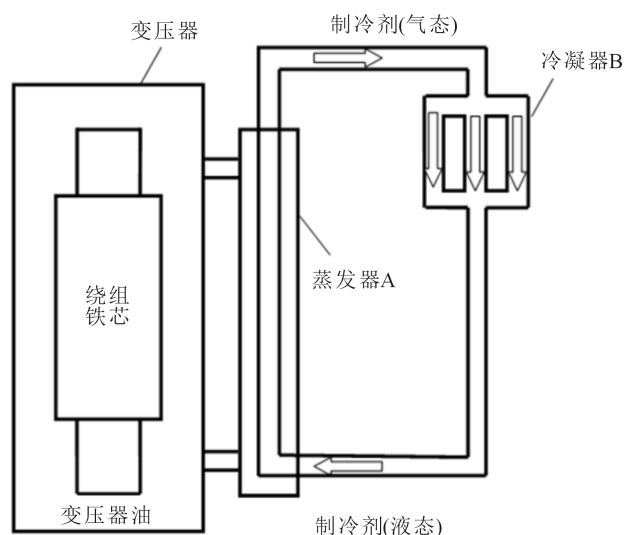


Figure 1. Evaporative cooling schematic  
图 1. 蒸发冷却原理图

本文以 SZ11-31500kVA/35kV 配电变压器为研究对象, 该变压器的额定容量: 31,500 kVA; 额定频率: 50 Hz; 冷却方式: 油浸自冷; 油箱尺寸: 3700 mm × 1450 mm × 2400 mm; 根据变压器实体数据利用 GAMBIT 软件建立计算模型。

根据变压器蒸发冷却系统运行特点, 对模型进行如下简化:

- 1) 考虑到模拟中油的流动主要在变压器铁芯绕组外部与蒸发器之间, 故暂忽略铁芯和高、低压绕组内部的导热问题。
- 2) 由于变压器流场呈对称分布, 故取此变压器流场的 1/2 进行数值模拟, 计算模型如图 2 所示。
- 3) 最外部的正方体模拟环境边界, 尺寸为 4000 mm × 4000 mm × 4000 mm。

模拟采用的蒸发换热器尺寸  $\Phi 320 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ , 高度为 830 mm。冷却管 86 根, 高度与蒸发换热器高度相等, 呈三角形排列, 管间中心距为 24 mm。为防止流体没有在蒸发换热器中充分停留而导致换热效率低下, 在冷却管三分之一和三分之二的地方各有一块厚度 20 mm 的六边形挡板, 挡板中的小孔尺寸与排布形式与换热器相同。在挡板最外一圈有冷却管通过。图 3 为蒸发换热器内部冷却管的排列情况, 图 4 是挡板与冷却管的截面图。

## 2.2. 控制方程

### 2.2.1. 连续方程

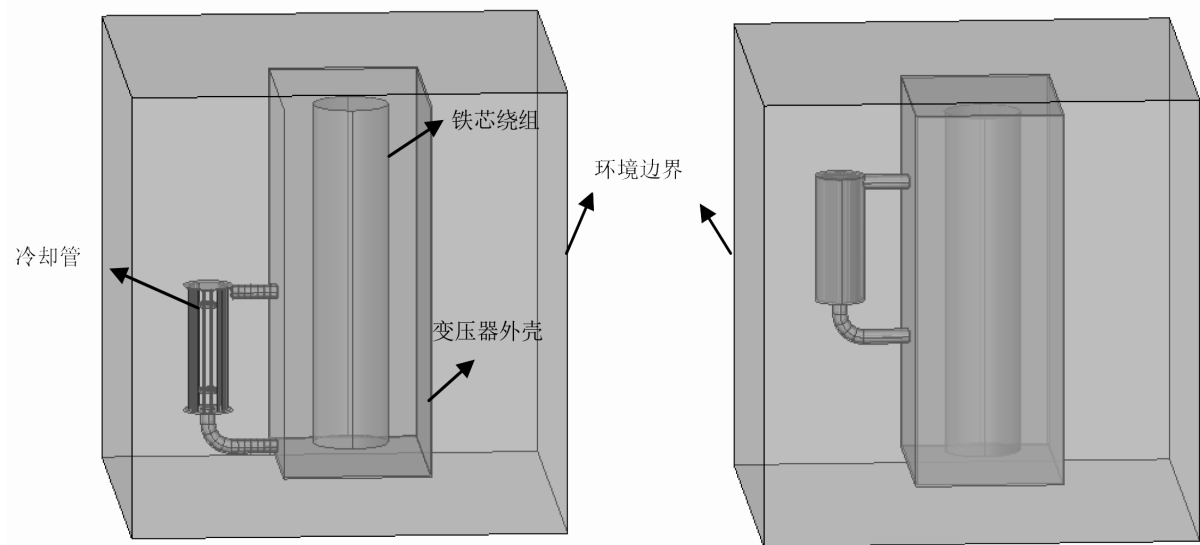
连续性方程是质量守恒定律在流体中的表现形式。在流场内取三维笛卡儿坐标系可写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

### 2.2.2. 动量守恒方程

动量守恒定律也称为牛顿第二定律, 可以描述为流体控制微元中流体动量对时间的变化率等于外界所有作用在该微元上的外力之和, 用数学方程描述  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的动量方程可以表示为:

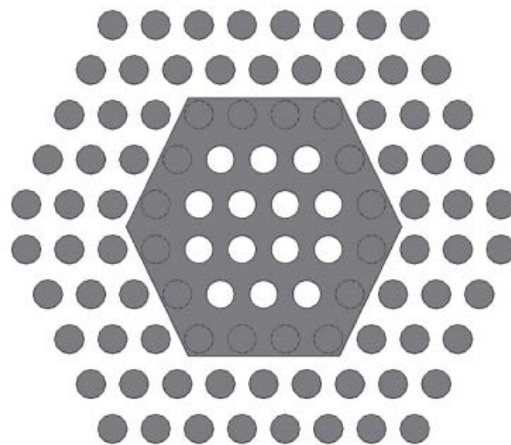
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$



**Figure 2.** Comparison of models of evaporative heat exchangers in different locations  
**图 2.** 不同位置蒸发换热器的模型对比图



**Figure 3.** Cooling pipe arrangement  
**图 3.** 冷却管排布图



**Figure 4.** Cross section of baffle and cooling tube  
**图 4.** 挡板与冷却管截面图

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中:  $P$  表示流体微元上受到的压力, Pa;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{zx}$  是粘性应力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的分量, 该粘性应力由流体分子的粘性作用产生并作用在控制微元体表面上;  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别表示微元体在三个方向上的体积力, 如果微元体只受重力作用, 且  $z$  轴方向竖直向上, 则  $F_x = F_y = 0$ ,  $F_z = -\rho g$ 。

### 2.2.3. 能量守恒方程

能量守恒定律也称为热力学第一守恒定律, 它表示的意义是控制微元中能量增加率等于外界进入控制微元中的净热流量与外界对流体微元所做的功的和。用数学方程表示为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \mathbf{grad} T\right) + S_T \quad (5)$$

以上式中,  $S_T$  为粘性耗散项, 表示流体内部热源与流体粘性作用而产生的热量,  $J$ ;  $\lambda$  为流体的换热系数,  $W/m^2 \cdot K$ ;  $c_p$  为比热容,  $J/(kg \cdot K)$ 。

上述方程涉及  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $P$ 、 $T$ 、 $\rho$  六个变量, 为使方程组封闭, 需补充流体的状态方程:

本模型中压力、温度和密度之间的规律按照 Boussinesq 假设变化, 公式如下:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (6)$$

$\rho_0$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $T_0$  为环境温度,  $K$ ;  $\beta$  ——热膨胀系数,  $1/K$ ;

求解上述方程即可解决流体的流动和传热情况。

变压器油的其他物性随温度变化的拟合公式如表 1 所示。

### 2.3. 网格划分

在数值模拟计算中, 网格的疏密、数量及质量的好坏等问题决定了日常的工作量, 网格质量的好坏问题直接影响到了后续迭代求解能否收敛的问题(图 5)。当然网格数量较少可以提高运算速度, 然而却得不到我们需要的有效解, 甚至出现完全不符合实际的结果。随着网格数量增多能够提高运算结果的精度但会加重计算机的求解负担, 使得整体运算周期变长, 当网格超过一定量时, 可能会超过计算机内存的求解能力。在考虑计算机计算能力的同时保证计算结果的精度, 最终得到的网格数为 300 万左右。

**Table 1.** Physical properties of transformer insulation oil

**表 1.** 变压器绝缘油的物性参数

物性参数	参数值拟合公式
密度 $\rho$	$\rho = 877 - 0.59(T - 273)$
动力粘度 $\mu$	$\mu = 11.71 \exp(-0.02T)$
定压比热 $c_p$	$c_p = 807.163 + 3.58T$
热膨胀系数 $\beta$	$1/T$

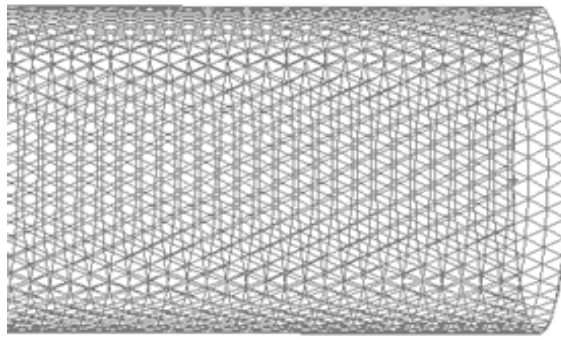


Figure 5. Cooling pipe local grid  
图 5. 冷却管局部网格图

## 2.4. 边界条件与求解器设置

边界条件和初始条件影响方程的收敛速度, 计算结果的精度和可靠性, 本文中流体在换热器与变压器中的流动属于自然对流情况, 故无需设定速度进出口的初始条件。边界条件设置如下: 铁芯绕组壁面单位面积发热量为  $8885.75 \text{ m/s}^2$ , 冷却管壁面温度  $313 \text{ K}$ 。蒸发换热器和变压器的壁面与外界环境耦合, 环境边界设置为  $323 \text{ K}$ 。流动为非稳态, 时间步长设置为  $1 \text{ s}$ , 迭代次数为  $120$  次。考虑重力对流动与换热的影响, 重力方向为沿  $Z$  轴负方向, 重力加速度为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

本文采用的流体力学计算软件 **Fluent**, 对前文描述的换热器和变压器的模型进行模拟计算, 从而研究其内部各处的温度和速度分布情况。压力和速度采用 **SIMPLEC** 耦合, 动量和能量方程采用二阶迎风格式, 对连续性方程, 动量守恒方程, 和能量守恒方程设置的残差分别为  $10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ , 其他参数为软件默认。初始化设置选择全局, 其他保持默认。求解器选用压力基求解器。求解时采用压力与速度的耦合方式选择 **SIMPLE** 算法, 压力的离散方式选择易于收敛的 **PRESTO!** 算法。

## 3. 数值模拟的结果

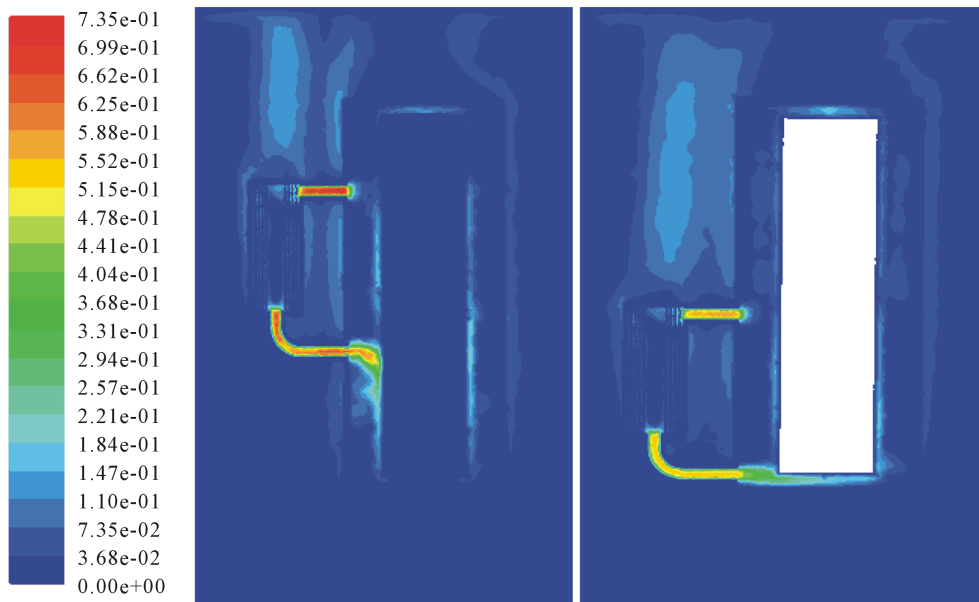
### 3.1. 流场情况

为了更加直观的观察温度速度的分布情况, 这里取  $y=0$  截面进行分析。图 6 为两种不同接口位置模型的流场分布对比图。油流的速度从初始的  $0 \text{ m/s}$  逐渐增加到最高流速为  $0.735 \text{ m/s}$ 。在变压器和蒸发换热器的接口管道内的流速达到最大。另外, 在蒸发换热器上方和接近变压器外表面的部分空气流动速度比其他位置的空气流动速度大, 最高达到  $0.294 \text{ m/s}$ 。在左边的模型中, 可以很明显的发现在蒸发换热器和变压器的接口管道中流动的速度很大, 最快的位置位于变压器油的出油口, 速度达到  $0.735 \text{ m/s}$ , 变压器油进油口的温度为  $0.588 \text{ m/s}$  左右。右边的模型中, 出油温度在  $0.552 \text{ m/s}$  左右, 而进油口温度在  $0.515 \text{ m/s}$  左右, 温差很小。

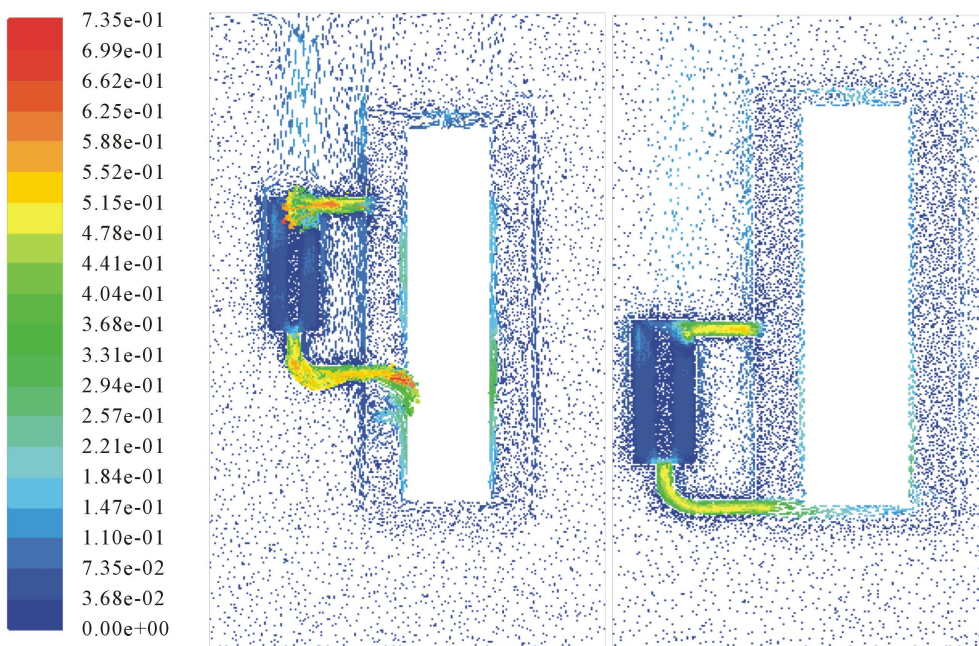
对比左右两个模型的速度分布情况, 可以发现, 当蒸发换热器在变压器上的位置靠上时, 模型内部的变压器油流动的速度相比靠下的模型的油流速度要快, 说明接口位置稍高一些的蒸发换热器的换热效果更好。

### 3.2. 速度矢量

图 7 为模型的速度矢量分布对比图, 速度矢量图可更加直观具体地反映各处油流动的大小及方向。计算开始, 当绕组铁芯发热时, 通过热传导的作用加热了周围油流的温度, 引起了油的密度的变化, 从而产生了浮升力驱动油的流动。在散热器内由于重力作用向下流动, 如此循环。



**Figure 6.** Flow field distribution  
**图 6.** 流场分布图



**Figure 7.** Speed vector  
**图 7.** 速度矢量图

在之前的速度对比中已经得出了接口位置高的油流速度要比接口位置低的油流速度高的结论, 从速度矢量的对比图中, 依旧支持之前的观点。即变压器油在接口靠上的模型中的流动速度要快。

从图 7 中还可以发现, 在蒸发换热器上部空气流动的速度要高于其他位置的空气流动速度, 这是因为热油从出油口进入到蒸发换热器中, 此时蒸发换热器上部的温度升高, 与上方的环境温度发生了热交换, 使得环境温度中气体的运动速度加快, 从而加强散热。

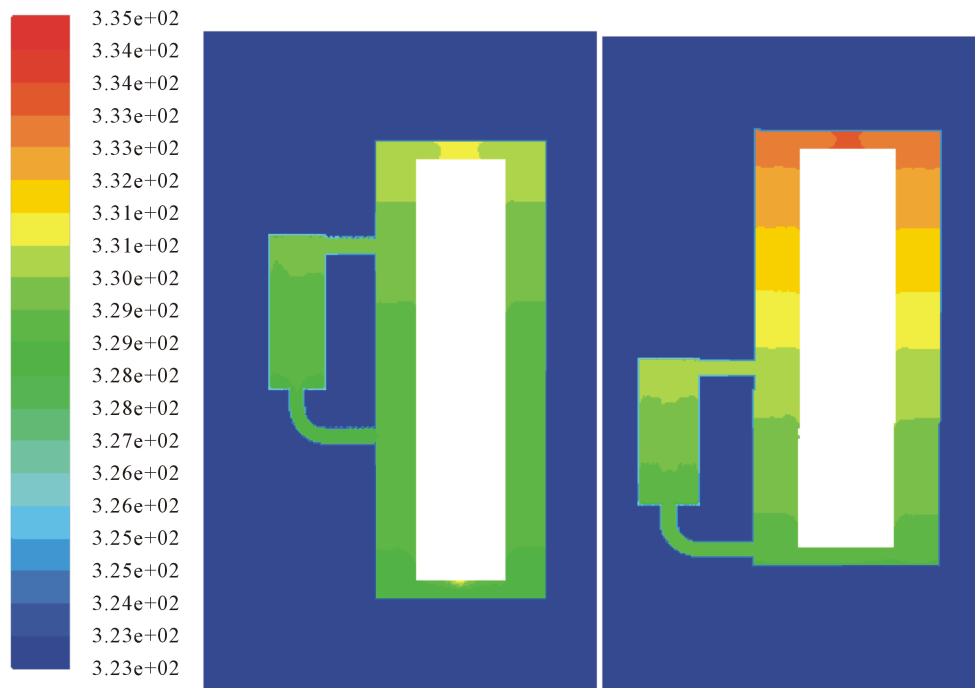


Figure 8. Temperature distribution  
图 8. 温度分布图

### 3.3. 温度分布

图 8 为模型的温度分布图, 从图中可以看出, 绕组和铁芯温度分布趋势都是下部温度低, 上部温度高。铁芯上部油温比其他部位油温要高。变压器铁芯温度从底部到顶部逐渐升高, 最低温度 331 K, 位于最下层, 顶层油温约为 335 K, 大约位于低压绕组高度的 13/14 处。此时环境温度的分布情况不明显, 左边模型中变压器的热点温度, 即温度最高的点为变压器上部位置, 温度为 332 K 左右, 从上端开始温度逐渐下降, 蒸发换热器和变压器中温度最低的点位于底部位置, 低温约为 328 K 左右。右边模型的热点温度约为 334 K 左右, 最低温度为 328 K 左右。整体来看, 左边的模型温度要低于右边模型, 说明蒸发换热器与地下变压器的接口位置的不同会对内部的流动与传热产生一定的影响, 在一定范围内的接口位置较高的蒸发换热器换热能力要优于位置较低的蒸发换热器。

## 4. 结论

- 1) 本文通过模拟变压器油在地下变压器与蒸发换热器之间的流动, 得到了其流场和温度场, 这对地下变压器的冷却提供了一个新的改进思路和优化方案。
- 2) 顶层油温较高, 速度也大, 且在油箱顶部形成了旋涡, 增强了换热。自然对流时在变压器和蒸发换热器的接口处以及铁芯绕组附近油流动的速度最快。
- 3) 通过对比不同位置蒸发换热器模型的流动和传热情况, 发现蒸发换热器和变压器连接位置对变压器散热有一定的影响, 相同工况下, 蒸发换热器位置高的换热效果更好。

## 参考文献

- [1] 姜益民. 城市电力变压器的发展趋势[J]. 变压器, 2005, 42(8): 1-4.
- [2] 何永秀, 朱苕, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评价研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.



- 
- [3] 卞辉, 姜益民, 袁聪波, 等. 强油油冷式冷却方式在城市地下变电站中的应用[J]. 变压器, 2011, 48(8): 43-47.
  - [4] 于海波. 关于地下变压器冷却系统的分析[J]. 通信电源技术, 2011, 28(6): 80-81.
  - [5] 成展鹏, 胡佐. 一起主变强油风冷回路不正常启动的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 93-95.
  - [6] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣, 等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1-6.
  - [7] 哈恩 E, 格里占尔 U. 沸腾换热[M]. 王兴国, 华诚生, 译. 北京: 国防工业出版社, 1988.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-9219, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [se@hanspub.org](mailto:se@hanspub.org)